

Prof. dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak  
Instytut Energetyki Ciepłej  
Politechnika Poznańska

Poznań, 8.11.2022

**ADMINISTRACJA**  
Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Wpłynęło dnia... 15 LIS. 2022  
Nr... 1992 ..... szt. ....

## Recenzja

### pracy doktorskiej mgr inż. Tomasza Stelmacha

**pt.: „BADANIA I SYMULACJE NUMERYCZNE ZJAWISK PRZEPLYWOWO-CIEPLNYCH W WYMIENNIKACH CIEPŁA Z RURAMI ELIPTYCZNYMI”**

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Tomasza Stelmacha stanowi Uchwała Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej nr 3/RN/8/2022 z dnia 21 września 2022r.

Praca zawiera 141 stron i podzielona jest na 9 rozdziałów, poprzedzonych spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń, a zakończona bibliografią liczącą 90 pozycji literaturowych oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim.

### 1. Omówienie pracy

Rozprawa doktorska mgra inż. Tomasza Stelmacha dotyczy badań eksperymentalnych oraz numerycznych w wymiennikach ciepłach z rurami eliptycznymi. Ze spisu literatury wynika, że Doktorant jest autorem 2 oraz współautorem 3 prac cytowanych w rozprawie.

W rozdziale 1, który jest wprowadzeniem do pracy, Autor przedstawia stan badań dotyczący wymienników ciepła, w szczególności dążenie do zmniejszenia rozmiarów tych urządzeń przy zachowaniu prawidłowej wymiany ciepła. Jednym z takich sposobów jest zastąpienie w wymiennikach ciepła rurek o przekroju kołowym, rurkami eliptycznymi. Ważnym zagadnieniem jest uzyskanie równomiernego rozplywu czynnika roboczego w przestrzeni rurowej, które w obecnych rozwiązaniach jest trudne do osiągnięcia. Wskazuje również prace autorów łączących badania eksperymentalne z obliczeniami numerycznymi. Warto zauważyć, że wśród prac badawczych, na które powołuje się Doktorant, duża ich część realizowana jest w Katedrze Energetyki Politechniki Krakowskiej. Z przeglądu literatury przedstawionej w tym rozdziale wynika temat oraz tezy, które w swojej pracy Doktorant postanowił udowodnić.

Rozdział jest interesujący, wprowadza do zagadnień, które będą przedstawione w dalszej części pracy.

W rozdziale 2 sformułowane zostały cele, tezy oraz zakres pracy. Doktorant postawił w swojej pracy dwie tezy:

1. wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła pomiędzy płynem a ścianką rurki o przekroju eliptycznym w symulacjach numerycznych z zastosowaniem wybranego modelu turbulencji, daje lepsze rezultaty niż znane korelacje dla przepływu przejściowego i turbulentnego;
2. możliwe jest zaprojektowanie takich kształtów kolektorów wymiennika ciepła, które pozwolą poprawić rozptył czynnika roboczego do przestrzeni rurowej wymiennika ciepła z rurami eliptycznymi.

Cele jakie sobie postawił jakie sobie postawił dla udowodnienia powyższych tez są następujące:

1. pomiar temperatury ścianki oraz czynnika roboczego przepływającego wewnątrz rury eliptycznej, potrzebne do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła dla przepływu przejściowego,
2. pomiar strumienia objętości przepływającej wody w przestrzeni rurowej wymiennika ciepła z rurami eliptycznymi przy zastosowaniu różnych kształtów kolektorów wlotowych,
3. analiza wyników badań eksperymentalnych i porównanie ich z wynikami symulacji numerycznych CFD.

W rozdziale znajduje się informacja o tym, że stanowiska, na których zostały przeprowadzone badania eksperymentalne w pracy w doktorskiej, zostały zbudowane w ramach grantów badawczych realizowanych w Katedrze Energetyki Politechniki Krakowskiej. Rozdział kończy się informacjami dotyczącymi treści zawartych w poszczególnych rozdziałach.

Rozdział 3 zawiera niezbędne informacje dotyczące modelowania przepływów w CFD. Są to w kolejności równania bilansu masy, pędu i energii oraz modeli turbulencji, które Doktorant wykorzystuje do obliczeń prezentowanych w tej pracy. Szczególnie ważny jest model turbulencji przejściowej SST-TR, ponieważ przepływy przejściowe są głównym przedmiotem jego zainteresowań.

W rozdziale 4 opisane jest stanowisko badawcze, na którym Doktorant zamierza udowodnić postawioną przez siebie pierwszą tezę tej pracy. W skład stanowiska badawczego wchodzi rura o przekroju eliptycznym, na którą nawinięty jest element grzewczy wraz z kształtkami pozwalającymi zamontować badany element w stanowisku badawczym. Pokazane są strefy lokalizacji termopar do pomiaru temperatury ścianki rury eliptycznej (S1 – S3), a także do pomiaru czynnika przepływającego przez rurę (T1 – T3), położenie punktów pomiarowych na powierzchni wewnętrznej, zewnętrznej ścianki oraz czynnika przepływającego.

W dalszej części rozdziału przedstawione są wyniki badań eksperymentalnych dla strumienia objętości przepływającej wody w zakresie od 0,15 – 0,4 m<sup>3</sup>/h, na podstawie których wyznaczone zostały współczynniki przejmowania ciepła oraz strata ciepła do otoczenia. Współczynnik ten dla wybranych wartości strumienia objętości został wyznaczony za pomocą korelacji z wykorzystaniem zależności Gnielińskiego oraz Dittus-Boeltera, a także symulacji numerycznej CFD. Wartości tych współczynników dla różnych liczb Reynoldsa zostały ze-

stawione na rysunku 4.24. Na tej podstawie można stwierdzić, że pierwsza postawiona przez Doktoranta teza została udowodniona.

W rozdziale 5 opisane jest stanowisko badawcze do oceny nierównomierności rozptyłów w krzyżowo-prądowym wymienniku ciepła z rurami eliptycznymi. Na tym stanowisku mierzone są strumienie objętości wody przepływające przez poszczególne rurki wymiennika, przy czym przepływ jest izotermiczny. Pokazana jest budowa kolektora wlotowego oraz wylotowego z rozmieszczeniem rurek wymiennika.

Rozdział 6 jest kontynuacją rozdziału 5 i zawiera wyniki pomiarów strumienia objętości wody przepływającej przez rurki wymiennika. Badania przeprowadzono dla siedmiu kształtów kolektora wlotowego w zakresie strumienia objętości wody na wlocie do kolektora z zakresu 1 do 5 m<sup>3</sup>/h. Dla każdego wariantu kolektora wejściowego przeprowadzona została analiza jakościowa otrzymanych wyników pomiarów strumieni objętości wody w poszczególnych rurkach wymiennika. Analiza obejmowała między innymi wyznaczenie liczby Reynoldsa w każdej z rurek wymiennika oraz określenie charakteru przepływu (laminarny, przejściowy, turbulentny). Dla wariantów 2 i 3 kolektora wlotowego, wyniki pomiarów, porównano z symulacjami CFD dla przepływu przejściowego i turbulentnego. Przedstawione wyniki wykazują dobrą zgodność eksperymentu z symulacją CFD.

W rozdziale 7 wprowadzono miarę nierównomierności rozptyłów wody do rur wymiennika ciepła za pomocą wzoru (7.1). Dla wszystkich badanych wariantów budowy kolektora wlotowego i zakresów zmienności strumienia objętości przepływającej w rurkach wymiennika wody wyznaczona została nierównomierność przepływu i na tej podstawie wybrany został wymiennik z wariantem nr 6 kolektora wlotowego o najmniejszej nierównomierności wypływu (9% – 14%).

Rozdział 8 zawiera analizę nierównomierności rozptywu na podstawie wyników badań przedstawionych w rozdziale 7. Do tej analizy wybrano wariant 6 kolektora wlotowego (najmniejsza nierównomierność rozptywu) z modyfikacją krućca wylotowego, którego położenie było brane pod uwagę w wariacie 2. Dla takiego wariantu przeprowadzono analizy jak w poprzednim rozdziale, a także symulację CFD, której wyniki porównano z danymi eksperymentalnymi dla 3 m<sup>3</sup>/h i 4 m<sup>3</sup>/h. Strumienie objętości przepływające przez poszczególne rurki charakteryzują się niewielką nierównomiernością strumieni oraz dobrą zgodnością z wynikami symulacji CFD. Wyniki świadczą o prawdziwości drugiej tezy postawionej przez Doktoranta.

Kończący pracę, rozdział 9 stanowi podsumowanie wyników pracy oraz wnioski końcowe. Na szczególną uwagę zasługują oryginalne osiągnięcia Doktoranta, do których można zaliczyć:

- wykazanie na podstawie eksperymentu oraz porównania tych wyników z symulacjami CFD, że symulacje numeryczne mogą lepiej przybliżyć współczynnik przejmowania ciepła od znanych z literatury korelacji empirycznych dla liczby Nusselta. Warto dodać, że Doktorant swoje badania w tym zakresie określił jako studium przypadku, ale przebieg tych współczynników na wykresie wskazuje na

tendencję, która pozwala przypuszczać, że ta teza może być prawdziwa również dla innych tego typu badań.

- wykazanie, że możliwe jest zaprojektowanie kształtu kolektora wlotowego wymiennika ciepła wraz z modyfikacją położenia kruise wylotowego, które pozwolą poprawić nierównomierność rozptywu czynnika roboczego do przestrzeni rurowej wymiennika ciepła z rurami eliptycznymi.
- wykazanie, że model turbulencji RANS SST-TG dedykowany dla charakteru przepływu przejściowego pozwala na uzyskanie dobrej zgodności eksperymentu z wynikami obliczeń CFD.

## 2. Uwagi

1. Równania bilansu masy, pędu i energii zostały przedstawione w formie różniczkowej oraz całkowej. Można to zrobić w sposób bardziej przejrzysty jeśli zastosuje się twierdzenie Reynoldsa o transporcie, wówczas każde z tych równań, w tym równanie ciągłości, można otrzymać praktycznie od razu:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) dV = \int_{V(t)} \frac{\partial \rho(\vec{x}, t)}{\partial t} dV + \int_{A(t)} \rho(\vec{x}, t) v_i n_i dA = \int_V \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \right] dV = 0$$

a stąd

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

W równaniu (3.1), str. 18, ostatni człon równania z prawej strony powinien być zapisany następująco:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i)}{\partial x_i} = 0$$

W równaniu (3.3) w jednym ze składników brakuje „dS”, a wzór (3.5) powinien mieć następującą postać

$$i_0 = i + \frac{u^2}{2}$$

We wzorze (3.6) brak wyjaśnienia co oznacza operator  $\otimes$ ? Nie ma go również w wykazie symboli. We wzorze (3.7) Doktorant przechodzi z symboliki wskaźnikowej na indeksy oznaczone zmiennymi  $x, y, z$ . Warto zachować jednolitą strukturę prezentowanych wzorów.

Tensor naprężeń wystarczyło podać dla płynu nieściśliwego, ponieważ praca doktorska ogranicza się do takiego płynu lub podać go w postaci syntetycznej, jak we wzorze (3.14).

2. W kolejnych podrozdziałach opisane są modele turbulencji, które są stosowane przez Autora pracy. Autor rozważa modele oparte o uśrednianie wartości chwilowych prędkości, ciśnienia, gęstości względem czasu (RANS), a pomija modele oparte na uśrednianiu przestrzennym (LES). Brakuje wyjaśnienia, dlaczego Autor w swoich rozważaniach pominął modele LES i od razu zajął się tylko modelami turbulencji RANS? Jest to istotne z punktu widzenia pierwszej tezy rozprawy.

3. Brak definicji liczby Reynoldsa. Od wartości tej liczby zależy, czy przepływ będzie laminarny, przejściowy czy turbulentny. Liczba Reynoldsa powinna być określona przed podaniem wyników w tabeli 4.3, str. 38. Postać tej liczby podana jest dopiero na stronie 47, wzór (4.9), ale nie ma podanego wzoru na wyznaczanie średnicy zastępczej  $d_e$ , a poza tym jeśli we wzorze zmienna  $\nu$  oznacza lepkość kinematyczną płynu (jak jest powszechnie przyjęte) to we wzorze tym niepotrzebna jest gęstość płynu. We wzorze (4.6) zamiast  $D$  powinno być  $d_e$ .

4. Na rysunku 4.23 pokazana jest siatka obliczeniowa. Widać zamodelowaną warstwę przyścienną, ale dlaczego warstwa ta jest ściśnięta w pobliżu dłuższej osi elipsy, a rozciągnięta przy krótszej? W programie ANSYS CFX jest możliwość wygenerowania warstwy przyściennej o jednakowej grubości. Ze względu na symetrię geometrii oraz warunków brzegowych, do obliczeń Doktorant powinien wziąć pod uwagę jedną czwartą elipsy, co pozwoliłoby zmniejszyć liczbę węzłów i elementów siatki obliczeniowej.

5. Przed prezentacją wyników obliczeń, powinny być podane warunki brzegowe w postaci jawnej. W pracy jest tylko wspomniane, że na wlocie rury płyn ma określoną prędkość i temperaturę, ale nie podano jakie. Nie wiadomo również jakie jest ciśnienie referencyjne, podano tylko, że ciśnienie względne na wylocie przyjęto jako 0. Poza tym nie ma w pracy żadnej informacji dotyczącej procesu zbieżności obliczeń oraz wartości przyjętego residuum. Brakuje porównania wartości temperatury zmierzonej z temperaturą wyznaczoną z obliczeń CFD w miejscach montażu termopar. W programie ANSYS CFX jest również opcja wyboru laminarnego przepływu, warto więc byłoby porównać wyniki obliczeń dla przepływu laminarnego z wybranym przez Autora modelem turbulencji oraz bez modelu.

6. Drugą tezę Autor dowodzi w ten sposób, że rozważa nierównomierność rozptywu do rur krzyżowo-prądowego wymiennika ciepła dla różnych konstrukcji kolektora wlotowego. W ten sposób bada 7 różnych wariantów kolektora, mierzy dla różnych strumieni masowych rozptyw wody na poszczególne rurki i porównuje wyniki eksperymentu z obliczeniami numerycznymi w środowisku ANSYS CFX. Następnie wybiera optymalną konstrukcję kolektora wymiennika. Warto zauważyć, że w programie ANSYS CFX możliwa jest optymalizacja badanej konstrukcji. Trzeba sparametryzować wielkości, które chcemy zmieniać w czasie obliczeń oraz podać zakres ich zmienności. Do tego należy dołączyć funkcję celu, którą w tym przypadku mogłaby być funkcja dana wzorem (7.1). Program sam znajdzie konstrukcję spełniającą warunek minimum funkcji celu. I taki jest sens stosowania metod numerycznych – są po prostu tańsze od eksperymentu i można przeanalizować więcej przypadków. Tutaj zmieniała się jedynie geometria kolektora, co nie generowało większych kosztów w przeprowadzonym eksperymencie. Więcej informacji dotyczących optymalizacji przepływów można znaleźć w Tutorialu do Ansysa CFX, gdzie rozważana jest optymalizacja konstrukcji miksera statycznego.

7. Do obliczeń numerycznych związanych z drugim eksperymentem, uwagi są podobne jak do pierwszej części obliczeń, to znaczy brak informacji na temat jakości siatki numerycznej, modelowania warstwy przyściennej oraz informacji na temat szybkości zbieżności procesu iteracyjnego.

8. Większość rysunków zawartych w pracy ma monotony charakter, będący ilustracją do zawartej pod nim tabeli i nie wnosi niczego do pracy, np. rys. 6.14, tabela 6.10, itd. W czasie

prezentacji można te niedoskonałości poprawić i inaczej przedstawić te wyniki. Na przykład połączyć rysunki 4.11, 4.13, 4.15, 4.17 i 4.21 dla różnych stref.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie zmniejszają merytorycznej wartości pracy.

### **3. Podsumowanie**

Praca mgr inż. Tomasza Stelmacha potwierdziła słuszność postawionych przez niego tez. Cele jakie sobie postawił dla ich potwierdzenia, zostały przez niego w pełni zrealizowane i stanowią Jego oryginalne osiągnięcie.

Doktorant wykazał się umiejętnościami prowadzenia i weryfikacji badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych, co jest bardzo cennym połączeniem w pracy naukowej.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgra inż. Tomasza Stelmacha spełnia wymogi określone w art. 13 Ustawy z dnia 14.03.2003r o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i mieści się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka i świadczy o dobrej ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w tej dyscyplinie.

Wnoszę zatem do Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Andrzej Trzciński*